

## Die heiße Sonnenatmosphäre

Von der Erde aus gesehen erscheint uns die Sonne als ein helles Objekt, das wie eine Scheibe über den Himmel zieht und uns tagtäglich mit Licht und Wärme versorgt. Daher nimmt die Sonne in den Mythologien aller Kontinente eine zentrale Rolle ein. So findet sich etwa im Armana Tempel eine Darstellung des Sonnengottes Aton, der seine helfenden Hände

denjenigen zustreckt, die sich ihm zugewandt haben und ihm huldigen. Die Sonne schickt uns aber nicht nur Licht und Wärme; sie hat weit über die sichtbare Scheibe hinaus eine ausgedehnte Atmosphäre, die bis in den interplanetaren Raum reicht und sich unter anderem auf das Klima und das Magnetfeld der Erde auswirkt.

## Beobachtungen der EUV Korona

Nur bei Sonnenfinsternissen, wenn der Mond das helle Licht der Sonnenscheibe vollständig verdeckt, wird ein Teil der Sonnenatmosphäre, die geheimnisvolle Korona, für wenige Momente mit bloßem Auge sichtbar. Die spektrale Analyse dieses Lichtes weist rote und grüne Emissionslinien auf, die man zunächst keinem bekannten Element zuordnen konnte. Man postulierte ein neues, unbekanntes Element „Koronium“. Erst 1943 identifizierte der schwedische Wissenschaftler

Edlén diese Linien. Er zeigte, dass es sich um dieselben Linien handelt, die der deutsche Physiker Grotrian zuvor in heißem Eisendampf beobachtet hatte, nämlich um verbotene Übergänge in 10-fach ionisiertem Eisen. Damit war klar, dass in der Korona Temperaturen von über einer Million Grad herrschen. Bei derartig hohen Temperaturen strahlt Materie vorwiegend im extremen ultravioletten Bereich (EUV) und im Röntgenlicht.

*Wie kann es sein, dass die Temperatur von 5800 K an der Sonnenoberfläche so enorm ansteigt, obwohl man sich von der Energiequelle entfernt? Dieser scheinbare Widerspruch ist ein wichtiges Forschungsgebiet unseres Institutes.*

Die Erdatmosphäre ist nur für wenige Wellenlängenbereiche durchlässig. Bereits im nahen UV-C Bereich bei 390 nm absorbieren Gase wie Ozon kurzwelliges Licht nahezu vollständig. Nur das schwache weiße Licht der Korona ist bei Sonnenfinsternissen und mit Koronagraphen, die das Bild der Sonnenscheibe abdecken - also „künstliche“ Sonnenfinsternisse erzeugen - direkt sichtbar. Dabei strahlen die

oberen Schichten der Sonnenatmosphäre vor allem im kurzwelligen Bereich sehr stark. Erst mit Raumsonden wie SOHO oder STEREO ist es möglich, die Grenzen der schmalen Durchlassfenster zu überwinden und neuartige Forschungsbereiche aufzutun. In anderen Spektralbereichen erscheint ein völlig verändertes Bild der Sonne.

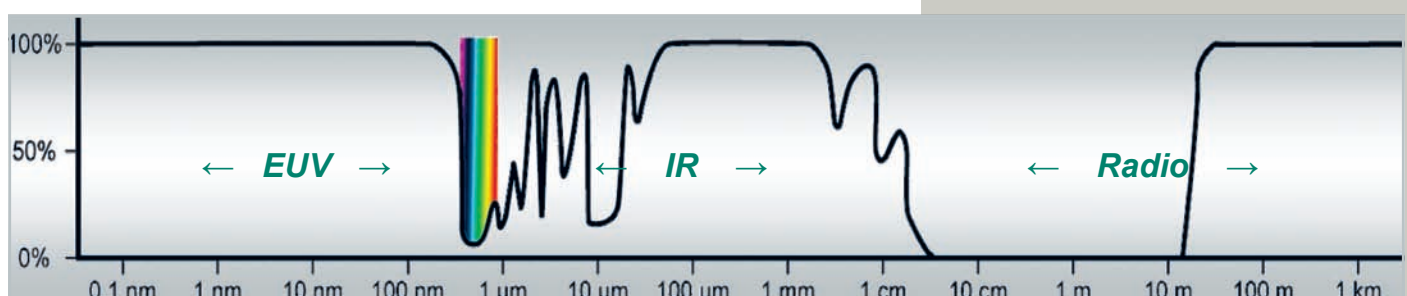


Anbetung des Aton, Armana Tempel.



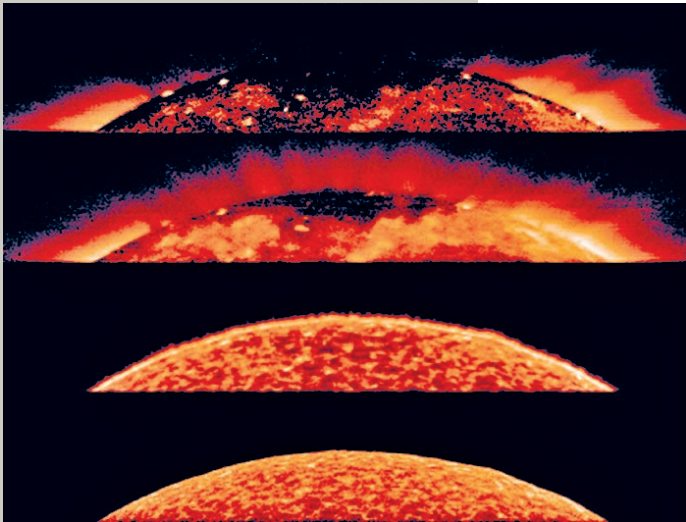
Sonnenfinsternis vom 16. Feb. 1980.

Die Absorption der Erdatmosphäre: In vielen Wellenlängenbereichen ist die Erdatmosphäre undurchlässig. Dort beträgt die Absorption 100%.



## Spektren sind wie „Fingerabdrücke“

Der Nordpol der Sonne im Licht von C, N<sup>+4</sup>, Mg<sup>+9</sup> und Fe<sup>+11</sup> (aufsteigend).



Das Licht, das ein Plasma ausstrahlt, kann je nach Druck und Temperatur sehr unterschiedlich sein. Vorgänge bei der Entstehung des Lichtes bestimmen die Zusammensetzung der Bestandteile und geben ihm eine Signatur. Spektroskope können diese Bestandteile trennen und separat aufzeichnen und verraten Einzelheiten über die Vorgänge bei der Lichtanregung, etwa die Temperatur. Während die von

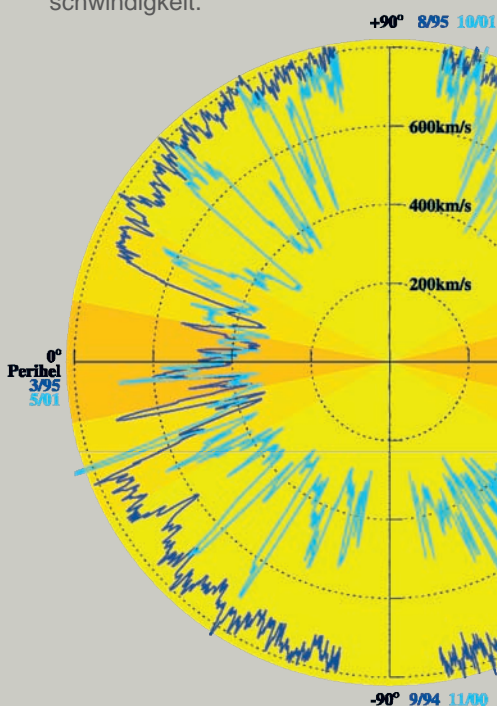
der Erde sichtbare Scheibe (die Photosphäre, 5800 K) mit Ausnahme von Sonnenflecken sehr kontrastarm ist, erscheinen bei höheren Temperaturen helle und dunkle Strukturen, die sich innerhalb von Minuten verändern können. In der Chromosphäre (10000 K) sind dunkle Gebiete in ein Netzwerk hellerer Strukturen eingebettet. In der Übergangsregion steigt die Temperatur schlagartig auf ein bis zwei Millionen Kelvin an und geht in die heiße Korona über. An den Polen sind bei  $1,4 \cdot 10^6$  K (im Licht von Fe<sup>+11</sup>) oft ausgedehnte dunkle Gebiete zu erkennen, die man traditionell als „Koronalöcher“ bezeichnet. Von hier gehen strahlenförmige Gebilde aus (Plumes), die häufig helle Fußpunkte haben.

## Der Sonnenwind – eine Reise zur Grenze unseres Sonnensystems

Das heiße Plasma der Korona wird bis in einen Abstand von etwa zwei Sonnenradien durch geschlossene Magnetfelder in Sonnennähe festgehalten. Dieses Feld ist so intensiv, dass seine Energiedichte die des Gasdrucks bei weitem übersteigt. In den „Koronalöchern“ öffnen sich die Magnetfelder jedoch in den interplanetaren Raum, so dass dort ein Teil des Gases der Sonnenatmosphäre ungehindert in den Weltraum abströmen kann. Jenseits von einigen Sonnenradien erfüllt dieser Partikelstrom als kontinuierlicher Sonnenwind die gesamte Heliosphäre. Mit Geschwindigkeiten zwischen 1,2 und 2,5 Millionen Kilometer pro Stunde ist er weit schneller als seine Schallgeschwindigkeit. Hindernisse, auf die dieser Strom trifft, wie die Gasatmosphäre

kleiner Kometen oder die riesigen Magnetosphären der Planeten, werden unter Ausbildung von Stoßwellen auf der Frontseite umströmt; auf der Rückseite werden die Atmosphären und Magnetosphären zu einem weit ausgedehnten Schweif auseinander gezogen. Schwankungen des Sonnenwindstromes stören das Druckgleichgewicht auf den Frontseiten der Planetenmagnetosphären und führen zu starken Schwankungen und Entladungsprozessen innerhalb der Magnetosphäre. Auf der Erde nehmen wir diese Prozesse durch starke Polarlichtaktivität und Schwankungen der Kompassnadel wahr. An seine Grenze stößt der Sonnenwind dort, wo sein Strömungsdruck nachlässt und dem Druck der Gaswolken des lokalen interstellaren Raumes nicht mehr gewachsen ist. In einer Entfernung von etwa 15 Milliarden Kilometer von der Sonne (etwa das Hundertfache des Radius der Erdbahn) wird er abgebremst und bildet dort die Heliopause in Form einer Stoßwelle. Sie bildet die äußere Grenze unseres Sonnensystems.

Polardiagramm der Sonnenwindgeschwindigkeit.





## Die Korona der aktiven Sonne

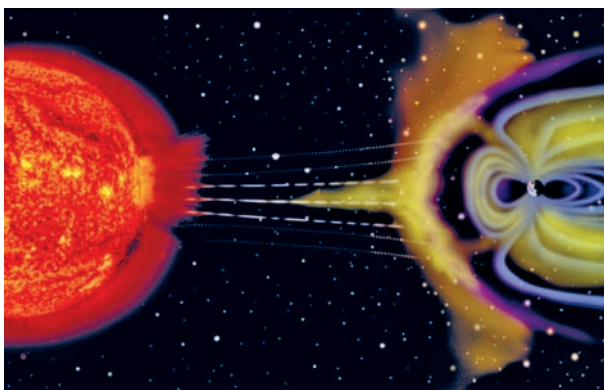
Im Rhythmus von 11 Jahren wechseln sich relativ ruhige Phasen der Sonne mit aktiven Phasen ab. Dieser Zyklus hängt mit dem solaren Magnetfeld zusammen, das sich - anders als das Erdmagnetfeld - alle 11 Jahre umpolt. Jedesmal, wenn der Nordpol zum Südpol wird, sieht man überall auf der Scheibe viele kleine Magnetpole, umgeben von hell strahlenden Strukturen. Hier spielen sich dramatische Szenarien

ab. Über dem Sonnenrand erscheinen große magnetisch getragene Plasmabögen (Loops). Kurzschlüsse von Magnetfeldern sind mit gewaltigen Eruptionen und heftigen Röntgenausbrüchen sowie dem Ausströmen höchst energiereicher Teilchen verbunden, Phänomene, die unter dem Begriff „Weltraumwetter“ zusammengefasst werden und in vielfältiger Weise mit der Erdatmosphäre wechselwirken.

## Koronale Massenausbrüche – die entfesselte Sonnenkorona

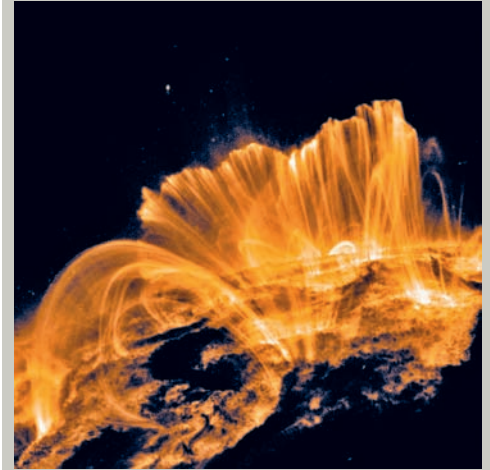
In Phasen höherer Sonnenaktivität, wenn koronales Plasma sich dem Einschluss durch Magnetfelder entziehen kann, werden innerhalb von Minuten große Gaswolken aus der Korona in den interplanetaren Raum ausgestoßen. Beobachtet wurden Ausbrüche von mehr als zehn Millionen Tonnen Materie (etwa die Masse eines Berges). Während geringer Sonnenaktivität finden solche Eruptionen nur gelegentlich statt, bei starker Aktivität mehrmals an einem Tag. Bei einem solchen Massenausbruch wird in wenigen Minuten, gespeist aus dem koronalen Magnetfeld, eine ungeheure Energie von bis zu zehn Millionen Terawattstunden freigesetzt. Das ist das 100-fache des Weltprimärenergieverbrauchs des Jahres 2001. Wird die Gaswolke in

Erdrichtung ausgeworfen, so trifft sie nach etwa zwei Tagen auf deren Magnetosphäre und kann für einige Stunden ihre Frontseite bis auf die Hälfte des üblichen Gleichgewichtsabstandes zur Erdoberfläche zusammendrücken. Mit einem kleinen Teil der Eruptionsenergie eines Massenauswurfes werden auch einzelne Protonen und schwerere Nukleonen an der Sonnenoberfläche bis auf relativistische Energien zu kosmischen Strahlenteilchen beschleunigt. Sie erreichen die Erde schon einige zehn Minuten nach der Eruption und durchdringen fast ungehindert die Wände von Raumsonden und Satelliten und auch die Schutzanzüge der Astronauten. Sie gefährden so die Gesundheit der Astronauten und können die Elektronik von Raumfahrzeugen zerstören. An der Erdoberfläche werden wir gegen diese energiereichen Partikel weitestgehend durch unsere Atmosphäre geschützt.

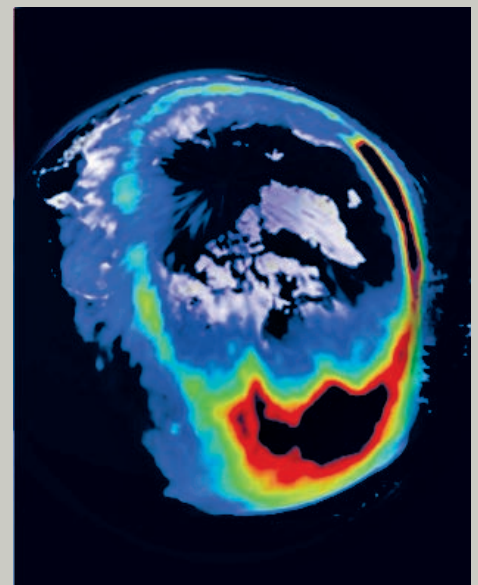
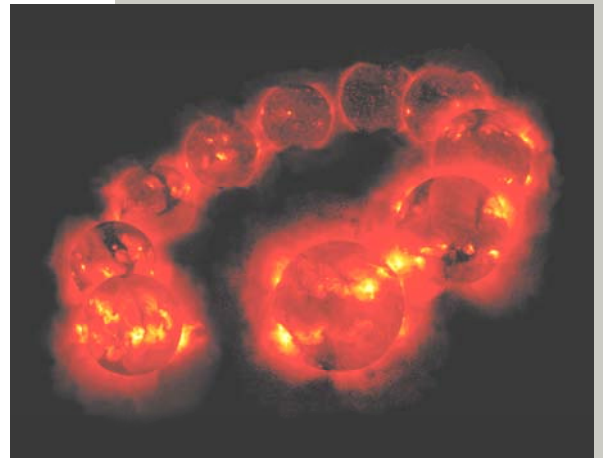


Solares Plasma trifft unser Magnetfeld.

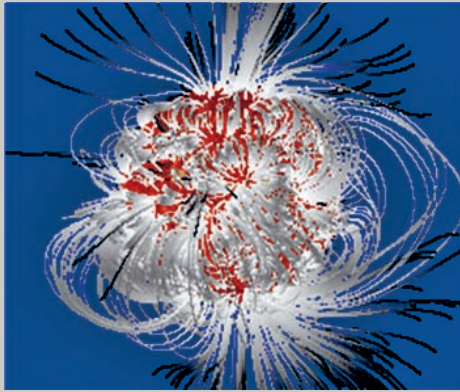
*Wie entstehen solche Massenausbrüche? Wann erfolgen sie und wie breiten sie sich aus? An diesen Fragen arbeiten Wissenschaftler des MPS mit Kollegen in vielen anderen Ländern.*



Aktive Region am Sonnenrand (oben) und die Sonne im Röntgenlicht über 10 Jahre (unten).

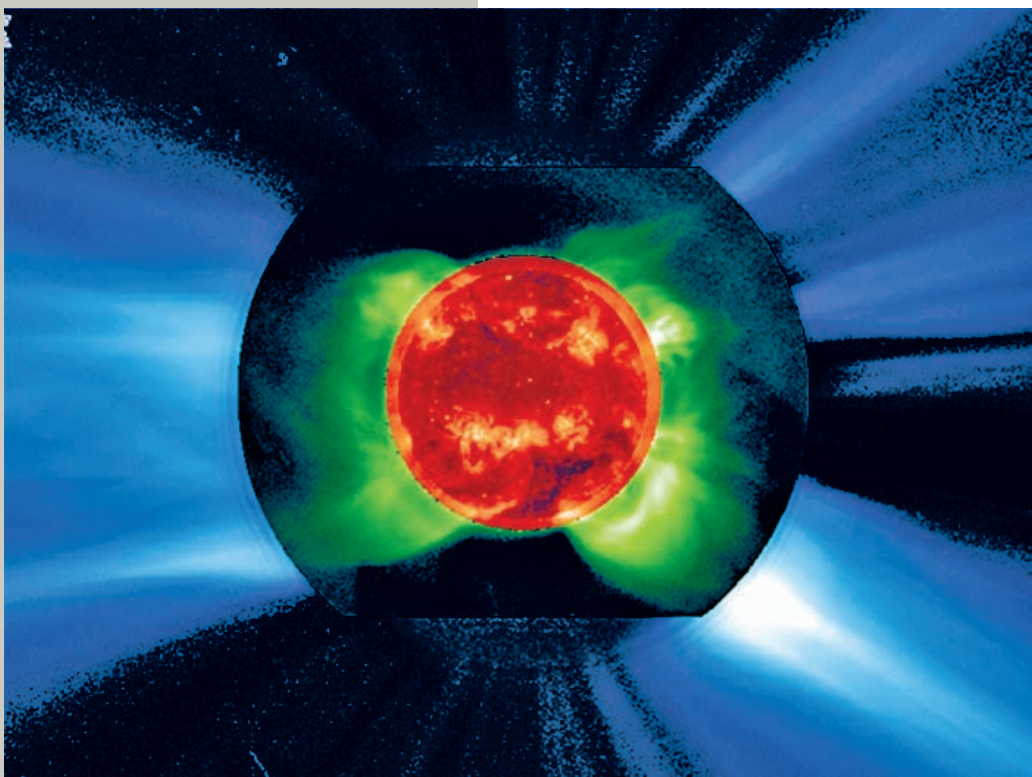


Polarlichtoval über dem Nordatlantik.



Extrapolation des koronalen Magnetfeldes.

Die Korona der aktiven Sonne; Komposit aus zwei Koronagraphenbildern und einem EUV-Bild der Sonnenscheibe (19.5 nm).

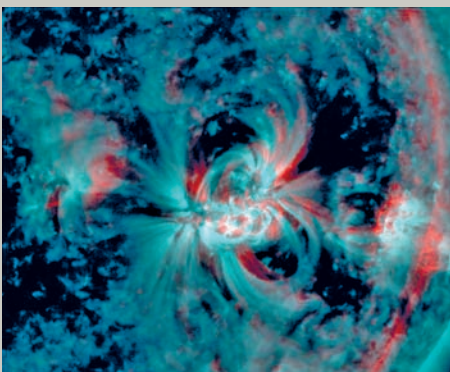


## Die Wettervorhersage für den Weltraum

Der Zeitpunkt eines Massenausbruchs wird vornehmlich durch die Form und Anordnung des sich immer in Bewegung befindlichen koronalen Magnetfeldes bestimmt, aus seiner Verankerung auf der Sonnenoberfläche und der daraus resultierenden Stabilität oder Instabilität. Ein ganz ähnliches Problem tritt in der Fusionsforschung auf, wo mit starken Magnetfeldern das Fusionsplasma eingeschlossen wird und eine Instabilität und damit der Verlust des Plasmas möglichst verhindert werden muss. Um solche Ereignisse vorherzusagen, ist

die Bestimmung des koronalen Magnetfeldes von großer Bedeutung. Obwohl es nicht direkt gemessen werden kann, können seine Form und Stärke ermittelt werden: Einerseits wird das Feld aus den Magnetfeldbeobachtungen an der Sonnenoberfläche mit aufwändigen Rechnungen in die Korona extrapoliert; andererseits werden Beobachtungen der STEREO Raumsonden genutzt, die Magnetfeldbögen auf der Sonnenoberfläche aus zwei verschiedenen Richtungen betrachten. Aus diesen Daten wird der dreidimensionale Verlauf ausgewählter Feldlinien rekonstruiert. Aus dem Vergleich beider Berechnungen hofft man, ein genügend genaues Modell des koronalen Magnetfeldes zu gewinnen, so dass Eruptionen und koronale Massenauswürfe in Zukunft vorhergesagt werden können. Eine weitere Aufgabe der STEREO Sonden besteht darin, die Ausbreitungsrichtung und Geschwindigkeit einer ausgestoßenen Gaswolke frühzeitig zu bestimmen. So können aus den bei starker Sonnenaktivität manchmal stündlich erfolgenden Auswürfen diejenigen herausgesucht werden, die sich auf die Erde zubewegen und ihr gefährlich werden können.

## Ausblick



3D-Aufnahme von Plasmabögen.

Obwohl die Sonnenphysik in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht hat, gibt die geheimnisvolle Korona immer noch viele Rätsel auf. Wissenschaftler sind dabei, bessere, schnellere Instrumente mit höherer Auflösung zu entwickeln. Gleichzeitig versuchen Theoretiker, Vorgänge in der Sonnenatmosphäre mithilfe von Großrechnern zu simulieren. Es reift die Erkenntnis, dass die Erforschung der Sonne keine isolierte Aufgabe ist,

sondern interdisziplinär erfolgen sollte - schon wegen der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen der Korona und unserer Biosphäre.

W. Curdt, B. Inhester  
Max-Planck-Institut für  
Sonnensystemforschung  
Max-Planck-Str.2  
37191 Katlenburg-Lindau  
<http://www.mps.mpg.de>

Kontakt: [curdt@mps.mpg.de](mailto:curdt@mps.mpg.de)